(2)

(19) JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **10153750 A**

(43) Date of publication of application: **09.06.98**

(51) Int. Cl **G02B 27/09**
B23K 26/06
G02B 3/04
G02B 7/02

(21) Application number: **08330283**

(22) Date of filing: **25.11.96**

(71) Applicant: **SUMITOMO ELECTRIC IND LTD**

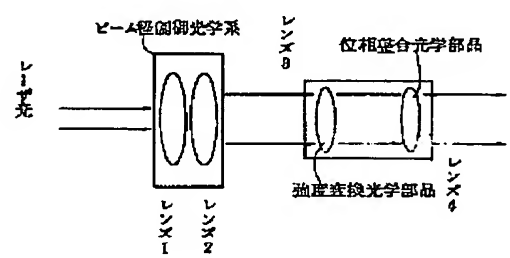
(72) Inventor: **EHATA KEIJI**
SHIOZAKI MANABU

(54) LASER BEAM SHAPING OPTICAL PARTS

(57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To make it possible to generate a uniform beam while freely expanding/reducing without limit of a beam size between first, second lenses, by serially connecting three parts of a beam size control optical system, an intensity conversion optical system, and a phase adjustment optical system.

SOLUTION: The beam shaping optical system is constituted of serially connecting three parts of the beam size control optical system, intensity conversion optical system, and phase adjustment optical system, and forms a target beam size by the beam size control optical system such as a beam expander, a zoom expander, a collimator, etc. This beam is laser light having a Gaussian distribution. This laser light is made a shape expanding a beam size in the central part of the lens and reversely reducing the beam size in the peripheral part in a certain distance by the intensity conversion optical system part, and beam power is uniformized specially. Although power is uniformized, a phase is disturbed. Then, the phase is corrected by the phase adjustment optical system part.



(19)日本国特許庁（ＪＰ）　(12) 公開特許公報（Ａ）　(11)特許出願公開番号

特開平10－153750

(43)公開日　平成10年(1998)６月９日

(51)Int.Cl.[6]	識別記号	ＦＩ	
Ｇ０２Ｂ　27/09		Ｇ０２Ｂ　27/00	Ｅ
Ｂ２３Ｋ　26/06		Ｂ２３Ｋ　26/06	Ｅ
			Ｚ
Ｇ０２Ｂ　3/04		Ｇ０２Ｂ　3/04	
7/02		7/02	Ｂ

審査請求　未請求　請求項の数５　ＦＤ　（全 19 頁）　最終頁に続く

(21)出願番号　特願平8－330283

(22)出願日　平成８年(1996)11月25日

(71)出願人　000002130
住友電気工業株式会社
大阪府大阪市中央区北浜四丁目５番33号

(72)発明者　江畑　恵司
大阪府大阪市此花区島屋一丁目１番３号住友電気工業株式会社大阪製作所内

(72)発明者　塩﨑　学
大阪府大阪市此花区島屋一丁目１番３号住友電気工業株式会社大阪製作所内

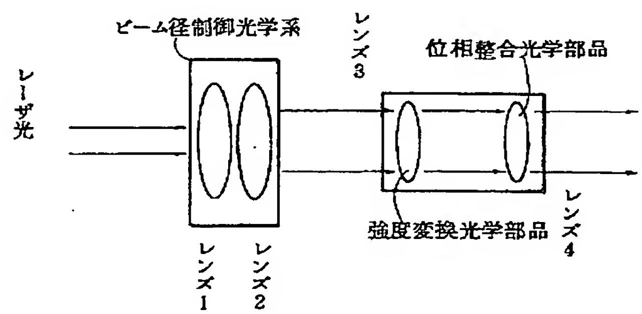
(74)代理人　弁理士　川瀬　茂樹

(54)【発明の名称】　レーザビーム整形光学部品

(57)【要約】

【課題】　炭酸ガスレーザやＹＡＧレーザのようにパワーの大きいレーザ光は切断、溶接、熱処理、孔開けなどの機械加工等に用いられる。レーザビームのパワー強度は一般に中心で高く、周辺で低い。ところが熱加工、熱処理の場合はビーム強度が均一であることが必要であることがある。その場合は、強度分布を平坦化するだけでなくて、位相も一致させる必要がある。炭酸ガスレーザの不均一分布（例えばガウシアン）のビームを、均一分布ビームに整形することが課題である。

【解決手段】　レーザビームの直径を拡大或いは縮小して適当な直径の平行ビームにするビーム径制御光学系と、不均一分布パワーのビームをパワー均一分布に変える強度変換光学系と、乱れた位相を一定位相に戻す位相整合光学系とを設ける。



【特許請求の範囲】

【請求項１】　発振器から放出されたレーザのビーム径を所定の位置において、目的とする所定のビーム径に制御するビーム系制御光学系と、レーザビームの不均一な強度分布を均一にするべくレンズの中央部ではビーム径を拡大し周辺部ではその反対にビームを縮小する形状としレンズ直径よりも狭い範囲においてパワーが均一になるようにする非球面を有する強度変換レンズと、均一化された強度ビームの前記強度変換レンズによって乱れたビームの位相をビーム面内で揃える位相整合レンズによって構成されることを特徴とするレーザビーム整形光学部品。

【請求項２】　強度変換レンズの中心からの距離をr_1とし強度変換レンズ面での電界の回転対称の複素振幅を$a_1(r_1)$とし、位相整合レンズの中心からの距離をr_2とし位相整合レンズの電界の回転対称の複素振幅を$a_2(x_2, y_2)$として、$q(r_1, d)=\exp(j\pi r_1^2/d\lambda)$、$q(r_2, d)=\exp(j\pi r_2^2/d\lambda)$、kを波数、dをレンズ間距離、$J_0(x)$は０次ベッセル関数両者の関係を

$$a_2(r_2)=(-jk/d)\,q(r_2, d)\int a_1(r_1)\,q(r_1, d)\times J_0(kr_1r_2/d)\,r_1\,dr_1$$

によって与え、そして、強度変換レンズにおいてレンズ厚み$h_1(r_1)$とレーザ入力強度を$I(r_1)$とし複素振幅$a_1(x_1, y_1)$の関係を、$a_1(x_1, y_1)=I_1(r)^{1/2}\exp(jkr_2/2R)\exp(jkh_1(r)(n-1))$によって与えて、位相整合レンズのレンズ厚み$h_2(r_2)$と複素振幅$a_2(r_2)$とレンズからの出力強度$I_2(r_2)$の関係を、

$$a_2(r_2)=I_2(r_2)^{1/2}\exp(jkr_2^2/2R)\exp(jkh_2(r)(n-1))$$

によって与えることとして、出力$I_2(r_2)$がある範囲で一定になるようにすることを特徴とする請求項１に記載のレーザビーム整形光学部品。

【請求項３】　非球面レンズである強度変換レンズ及び位相整合レンズのマウント時の歪を除去するためにマウント接触部に切り込みと段差を設けたことを特徴とする請求項１に記載のレーザビーム整形光学部品。

【請求項４】　レーザビームの特性値の変動を吸収すべく強度変換レンズ及び位相整合レンズの間隔を調整可能にしたことを特徴とする請求項１又は２に記載のレーザビーム整形光学部品。

【請求項５】　ビーム径を制御する光学系と、強度変換レンズと位相整合レンズは、中心ずれの影響を小さくし操作性を向上させるために二重マウントとした事を特徴とする請求項１～４のいずれかに記載のレーザビーム整形光学部品。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

【発明の属する技術分野】本発明はレーザビームを整形し、空間的に均一パワー分布のレーザビームを生成する装置に関する。空間的に均一分布というのは、ある有限の領域においてレーザパワーが一定であるということである。それだけでなくて本発明は位相も揃っていてしかもある領域でパワーが同一であるようなビームを作ることを目的とする。

【０００２】本発明は均一レーザビームを必要とする多くの用途に応用できる。例えば、熱加工の分野では、金属などの表面焼き入れ処理（自動車エンジンカムの処理等）、セラミック、樹脂等の加工、特に高密度実装の為のプリント基板の微細穴開けなどに適用できる。この場合パワーの大きい炭酸ガスレーザを使うことが多い。その場合赤外光になるから、その場合レンズは例えばＺｎＳｅなどを用いる。

【０００３】

【従来の技術】レーザ光の空間的強度分布は一様でない。レーザ装置によって空間分布は様々である。レーザの軸線方向をＺ軸とする。空間分布というのは、ＸＹ面内でのパワー分布のことである。レーザパワーの空間的な分布がガウス関数に従う場合はガウスビームという。レーザパワーの分布はガウス関数によって近似されることが多い。ガウス分布は中心でエネルギー密度が高くて周辺では弱い。対称性も良い。しかしガウスビームといっても実際には偏りがあったりガウシアンカーブからずれているものもある。

【０００４】用途によってはガウスビームであっても十分に有用である場合もある。通信、測定などに利用するレーザの場合はガウスビームでも十分に役に立つ。しかしレーザを材料の切断、溶接、熱処理などに利用しようとする場合、パワーの空間分布が問題になる場合がある。典型的なビーム形と考えられているガウスビームはパワー密度がＸＹ面内で不均一である。中心部にエネルギーが偏りすぎているからである。ある直径の内部では一定の密度のパワーがあるという一様分布のレーザビームが望まれることもある。

【０００５】それに実際のレーザのビームの分布はガウシアンではない。ガウシアンは第１近似であって、様々の変わった空間的分布をしているレーザビームがある。用途によってはそのままで十分要求を満たすことができる。しかしある場合には均一パワーのビームがより望ましいということがある。均一パワーのビームを必要とする分野は測定技術、表面処理技術など多岐に渡っている。例えば、分光器、通信受光素子などの検知器において感度をさらに向上させるためには均一エネルギービームが必要である。大面積対象物を表面処理する場合なども均一パワーのビームが有用である。

【０００６】均一エネルギー密度のレーザビームを得るためにレーザそのものを改良するという途もある。しかしレーザ自体の改良によって均一ビームを作り出すのは

容易でない。そこでガウスビーム等不均一ビームを出すレーザの前に光学系を置いて、その光学系によってビームを整形し均一エネルギー密度にする、という事が試みられる。

【０００７】① ［ビーム分割法］　そのようなものとして、カライドスコープ、セグメントミラーという光学系が提案される。これらはレーザビーム断面を縦横幾つもの小正方形の領域に分割し、それぞれの小正方形の波面を平面波にして、平面波自体を屈折させある面の同一小正方形に投影するものである。元のレーザビームも小領域内ではエネルギー密度分布の揺らぎは極小さいものである。これらを重ね合わせるのであるから、整形後のビームのエネルギー密度はほぼ一様になるはずである。初期のビーム断面積をＳとし、領域分割数をＭとすると整形後のビーム面積はＳ／Ｍとなり、整形後の断面積は小さい。領域分割数が多いと、整形後のビームは小さくなる。図１にそのようなセグメントミラーによる整形を示す。領域分割数が少ないと平面波にしてもエネルギー揺らぎが残るから整形後のパワー揺らぎが大きい。

【０００８】しかしこのように縦横に正方形に分割し平面波変換し重ね合わせるものはもっと致命的な困難がある。コヒーレント光であるレーザビームを一旦分割して重ね合わせたために干渉の影響を強く受ける。干渉は複雑に整形後のビーム密度に揺らぎを与える。さらにレーザビームの波長が長い場合、例えば炭酸ガスレーザ（１０．６μｍ）の場合は回折の影響も強い。干渉、回折など波動光学的な現象が強く現れるので整形後の小領域（正方形）において位相分布は極めて複雑に変動する。単にパワーを利用するだけなら位相は乱れていても良い。しかし用途が広まるとともに位相が揃っているということも条件になってくる。

【０００９】図２は透過型ビームインテグレータによって作られる小領域でのパワー密度を示す。ある範囲（正方形領域）においてエネルギー密度はガウシアンより均一に近づいているが、よくみると微小なピークや谷の集合である。とても滑らかに変動するおとなしい均一性ではない。欠点はそれだけではない。空間的に分割した小領域の光を集めているから、集光点のみで均一になるが、それから前後にずれた位置では却って不均一になってしまう。不均一性が増幅されるということができよう。集光点の設定要求が厳しくなり、集光点以外では利用できない。

【００１０】② ［ＵＳＰ３，４７６，４６３号（Justin L. Kreuzer ）］これはふたつの非球面レンズＧ、Ｈを組み合わせて、ある半径Ｒの円内でのレーザ強度分布を均一化したものである。クロイツアーは凹型レンズＧと凸型レンズＨの巧妙な組み合わせによってガウシアンビ＊ームをレンズ１杯に広がる均一分布のビームに整形することに成功している。幾何光学による取扱いであって簡明であって直観的な手法である。

【００１１】クロイツアーの光学系は第１レンズＧは入射面が平坦に、第２レンズＨは出射面が平坦になっている。対向面が曲面である。その曲面の形状を決めることが主題になる。第１レンズＧへ入射するビームは平行なガウシアンビームである。第１レンズＧは、中央部が凹レンズで端部が凸レンズになっている。第２レンズＨは凸型のレンズである。ビームの中央部は高密度であり周辺部は低密度であるから、中央部のビームを拡大し、周辺部のビームは集中させる。それを第１レンズＧが行う。第２レンズＨは非平行であるビームを平行に直す作用がある。第１レンズは密度を均一にするためのレンズであり、第２レンズは平行ビームに矯正するためのレンズである。そのようなレンズの組み合わせによってガウシアン分布した平行ビームを半径Ｒの円内で均一密度の平行ビームに整形する事ができる。

【００１２】この明細書に示された２レンズ間に於ける光線の広がりを図１６に示す。光源からの光はガウシアンで中央部に局在している。目的とするビームはレンズＨの背後にあって均一パワー分布している。半径がＲのレンズであるからレンズＧを出た光線は全て広がる傾向にある。発散型のビームである。レンズＧでの半径方向の座標をｇとし回転方向の座標をφとする。つまりレンズの出射面での中心を座標中心とし（ｇ，φ）によってレンズＧ面を表す。半径方向座標として r_1 を使わないのは、サフィックスが煩雑になるのを避けるためである。

【００１３】反対に第２レンズＨの対向面上にも座標を想定する。これは円筒座標（ｈ，Φ）を座標とする。レンズの半径をいずれもＲとしてｇ＝Ｒを通過した光が、レンズＨの半径Ｒの点を通過するというサムルールを課する。つまり二つのレンズが同一径であって全光量も同一でありレンズＨの全体にビームが均一に広がっているという事を要求するのである。最外周を通る光は真っ直ぐに進むはずであるから、レンズの外周Ｒではレンズ面は軸直角面に対して平行であることが分かる。

【００１４】そして初めのレンズＧでのビーム空間分布は広がりをａとするガウシアンであるとする。広がりａと以後も表現するが、これはパワーが最大値の e^{-1} に減少する点であってそれより外側にもパワーは存在する。非球面のレンズによって光線を整形するから適合する寸法は一義的に決まる。スケールファクターであるａを一つ決めてしまう必要がある。広がりａの一義性に注意すべきである。

＊【００１５】

レンズＧの直前：　$\exp(-g^2/a^2)$　　$g \leq R$　　（１）

【００１６】広がりａとレンズ半径Ｒは、一般にどちらが大きくてもレンズの設計は可能である。しかしＲがａより小さい場合レンズによって集光されず無駄になる部分が多いという事であるから、実際には採用されないで

あろう。Rは広がりaをカバーすべく、R＞aであるべきである。これによってレンズはビームを集光しているということができる。そのような暗黙の前提があると考えるべきである。このビームがレンズGとHによって均一なビームになる。

【0017】

$$\text{レンズHの直後：} \quad I \qquad h \le R \qquad (2)$$

【0018】レンズGを通過したビームは全てレンズHに入りレンズHは周縁まで同一光量が出てくるのでビーム保存則が成り立つ。（1）のレンズ面での積分と（2）のレンズ面での積分が同一であるということである。

【0019】

$$\iint \exp(-g^2/a^2)\, g\,dg\,d\phi = \iint I\, h\,dh\,d\Phi \qquad (3)$$

【0020】∫範囲はg、hについては0～R、φ、Φに付いては0～2πである。

【0021】

$$\pi\sigma^2\{1-\exp(-R^2/a^2)\} = \pi R^2 I \qquad (4)$$

【0022】ここから2枚目のレンズの後での均一パワーは

【0023】

$$I = (a^2/R^2)\{1-\exp(-R^2/a^2)\} \qquad (5)$$

【0024】となる。これは2枚目レンズによる均一化後のビームのパワー密度である。レンズGでr＝gを通過するビームがレンズHではr＝hを通るとする。これが光線軌跡をもとにした解析の手法である。gとhは一義的に対応する。レンズGでガウシアンで、レンズHでは平坦ビームであるからレンズGからレンズHへは必ず広がる筈である。半径R上を除いて、g＜hであるはずである。gとhの対応は（3）の積分の0～g，0～hの何れに於いても成り立つという条件によって求められる。ビーム軌跡を求めるというのはそういう事である。（3）と表見的には同様になるが積分範囲がgに関しては0～gまで、hに関しては0～hまでとなる。

【0025】

$$\iint \exp(-g^2/a^2)\, g\,dg\,d\phi = \iint I\, h\,dh\,d\Phi \qquad (6)$$

【0026】これを積分すると、

【0027】

$$\pi a^2\{1-\exp(-g^2/a^2)\} = \pi h^2 I \qquad (7)$$

【0028】となる。（7）のIに（5）を代入すると、gとhの関係が決まる。

【0029】

【数8】

$$\frac{R\{1-\exp(-g^2/a^2)\}^{1/2}}{\{1-\exp(-R^2/a^2)\}^{1/2}} \qquad (8)$$

【0030】これが初めのレンズGの半径距離gを通ったビームがレンズHの半径距離hを通るとして、hとgの関係を与える式である。gとhを対応点と呼ぶ。最初のビームがガウシアンと仮定しているからこのようになる。そうでなく2次関数分布だとしても同じ手法によってgとhに関係を与えることができる。ここまでは光学を全く使っていない。等分配の要求を式に表しただけである。

【0031】幾何光学的考察に移る。平行ビーム（Z軸に平行）がレンズGの点（g，φ）で屈折し軸線（Z軸）とθをなすビームとなりレンズHの点（h，Φ）を通り再度屈折してZ軸平行ビームになるとする。傾きθは、gとhの違いから決まる。レンズ間の距離をsとすると、大体のところ、s tanθ＝h－gである。wはsより少し大きくそれは約sθ²／2であるが、厳密には

【0032】

$$h - g = w\sin\theta \qquad (9)$$

【0033】である。φ＝Φは当然であるから以後角度方向は問題にしない。初めと終わりのビームは何れもZ軸に平行であるからg点とh点での屈折角は等しい。屈折率の等しいレンズを使うと、ここでのレンズ接線が平行だということである。これは重要な性質である。Gレンズの曲面の式をZ_1（g）、Hレンズの曲面の式をZ_2（h）とすると、gとhが対応点であるとき微分$dZ_1/dg = dZ_2/dh$であるということである。二つのレンズの間の空間をビームが飛行する距離をwとする。中心でのレンズ間距離をsとする。反対側の面（平坦面）間の距離をtとする。t＞sであってtもsも定数である。中心を通るビームの光学距離（屈折率と光路長の積の総和）は

【0034】

$$P_0 = n(t - s) + s \qquad (10)$$

【0035】である。1項はレンズ中の光学距離、2項は空間での光学距離である。gとhを通る光学距離P（g，h）は空間中（w）でZ軸よりθだけ傾いているから

【0036】

$$P(g,h)=n(t-w\cos\theta)+w \qquad (11)$$

【００３７】となる。１項はレンズ中の光学距離、２項は空間での光学距離である。空間中で光路がθだけ傾くから光路が延びる。θはｇとｈの違いによって必然的に発生するものである。光路の伸びがあるからレンズＧとＨがその分だけ薄くならなければならない。直観的にはそういうことである。どの経路をとっても位相が合致するために光学距離が等しくなっていることが必要である。P_0＝Ｐ（ｇ，ｈ）であるということである。

【００３８】

$$s(n-1)+w(1-n\cos\theta)=0 \qquad (12)$$

【００３９】これは位相整合の条件である。これまでの式ではフェルマー原理を使っているがレンズの屈折の式を用いていない。レンズＧの点（ｇ，φ）で面法線と入射ビームがなす角θｉと屈折ビームがなす角θｒ、ビームと軸線のなす角θの間にはスネル則がなりたつ。レンズＧのｇ点とレンズＨのｈ点での傾きが同一であり屈折は反対向きに同量だけ起こっているからｈ点でのθｉ、θｒ、θはｇ点でのものと全く同一である。ビームの軸線からのズレθは屈折によって発生したものであるから、

【００４０】

$$\theta=\theta r-\theta i \qquad (13)$$

である。スネルの法則からｋ

$$n\sin\theta i=\sin\theta r \qquad (14)$$

【００４１】となる。レンズの曲面はZ_1（ｇ）とZ_2（ｈ）で与えられるが、これらのｇ，ｈによる微分が、接線の傾きを与え、これはθｉの正接（ｔａｎ）に等しい。

【００４２】

$$\tan\theta i=dZ_1(g)/dg \qquad (15)$$

$$\tan\theta i=dZ_2(h)/dh \qquad (16)$$

【００４３】これは先述のようにｇ点とｈ点でのレンズ接線が平行という性質を表したものである。それだけでなくこれらによてレンズ曲面を求めることができる。（１３）と（１４）からθｒを消して、

【００４４】

【数１７】

$$\tan\theta i=\frac{\sin\theta}{n-\cos\theta} \qquad (17)$$

【００４５】となる。クロイツアーは（９）と（１３）から

【００４６】

【数１８】

$$\frac{1-n\cos\theta}{\sin\theta}=\frac{-(n-1)s}{h-g}=u \qquad (18)$$

【００４７】とおく。これはθだけを含む左辺と、ｈとｇだけを含む右辺に分けたものである。ｕは負の新たな変数である。θだけを含む（１７）を二乗して（１８）を用いると、

【００４８】

【数１９】

$$\tan^2\theta i=\frac{1}{u^2-1+n^2} \qquad (19)$$

【００４９】となる。これは変数ｕを含みｕは（１８）の２項目でもあるから、それを代入して、

【００５０】

【数２０】

$$\tan^2\theta i=\frac{1}{n^2-1+\dfrac{(n-1)^2 s^2}{(h-g)^2}} \qquad (20)$$

【００５１】これはレンズＧとレンズＨに共通の正接であって、これがレンズ曲面の半径方向の傾きをあたえるのであるから、ｔａｎθｉをｇによって積分するとZ_1（ｇ）が得られ、同じｔａｎθｉをｈによって積分するとZ_2（ｈ）が得られる。

【００５２】

【数２１】

$$Z_1\ (g) = \int_0^g \{n^2 - 1 + \frac{(n-1)^2 s^2}{(h-g)^2}\}^{-1/2} dg \quad (21)$$

【００５３】

【数２２】

$$Z_2\ (h) = \int_h^0 \{n^2 - 1 + \frac{(n-1)^2 s^2}{(h-g)^2}\}^{-1/2} dh \quad (22)$$

【００５４】（２１）の積分においてｈはｇの関数であって、（８）によって与えられている。（８）を反対に解いてｇをｈの式によって表現すると、（２２）の積分ができる。コンピュータによればこれらを厳密に計算することができる。直観的な解を求めるためには、クロイツアーは（２１）において、レンズ間距離ｓがレンズの半径方向の座標の差（ｈ－ｇ）よりも大きいので前の項を省略した近似式を使って評価することもできるとしている。

【００５５】

【数２３】

$$Z_1\ (g) \fallingdotseq \frac{1}{(n-1)\ s} \int_g^0 (h-g)\ dg \qquad (23)$$

【００５６】

【数２４】

$$Z_2\ (h) \fallingdotseq \frac{1}{(n-1)\ s} \int_h^0 (h-g)\ dh \qquad (24)$$

【００５７】このようにしてクロイツアーは図１７に示すような二枚レンズによってレンズ一杯に広がった均一ビームを生成する事ができるようになったと述べている。初めのレンズは凹レンズに近似し、周辺での接線はＸＹ面に平行である。次のレンズは凸レンズに近似し周辺での接線はＸＹ面に平行である。レンズいっぱいにビームを広げるからこのようになる。実施例では半径Ｒが１５mmのレンズ２枚を組み合わせて直径が３０ミリの均一パワービームの整形に成功している。

【００５８】

【発明が解決しようとする課題】

②ＵＳＰ３、４７６、４６３は巧妙な発明である。レンズ２枚の組み合わせで、ガウシアン分布ビームを均一分布ビームに整形できる。しかしながらいくつかの問題がある。

１．一つはレンズＧとレンズＨの口径いっぱいに均一ビームを整形しているということである。ふたつ目のレンズＨの面積いっぱいに均一のパワーI_0を生成している。レンズＧレンズＨの間ではビーム径の拡大縮小を行う余地がない。そのために周辺部ではレンズ面ＺはＸＹ面に平行で、必ずｄＺ／ｄｇ＝０（ｇ＝Ｒ）となり、ｄＺ／ｄｈ＝０（ｈ＝Ｒ）となっていた。つまりいずれのレンズも半径に沿って（０＜ｇ，ｈ＜Ｒ）変曲点が一つしかない曲面になっていた。

【００５９】２．しかし要求される均一ビームの直径がそれほど大きくない場合もある。②は３０mm径の大口径ビームを生成している。しかし均一ビームであって直径が１０mmとか２０mmであって良い場合もある。そのような場合レンズ直径も小さくするというのではレーザビームの損失が大きくなる。そうでなくて、初めのレンズＧと次のレンズの間でビーム縮小や拡大ができるほうがより好都合である。特にビーム縮小が行えるということは重要である。後でも説明するが（図９）非球面レンズの場合、わずかなパラメータのズレが著しい不適合を引き起こす。それでレンズ自体は大きい方が設計や調整が容易である。だから初めのレンズＧと次のレンズＨの間でビーム縮小を行えるほうがよい。

【００６０】３．もう一つは、レーザビーム径ｂとレンズの定数ａの間の関係が硬直的であるといういうことである。初めから広がりａのガウシアンビームを出すレーザであればこのレンズが適合するが、それ以外のレーザには不適である。だからレーザ毎に異なる形状のレンズを設計し製作しなければならない。これは非球面レンズのコストを押し上げることになる。レーザビーム径ｂとレンズの定数ａが一致しない場合（ｂ≠ａ）であっても同じ非球面レンズを利用できることが望まれる。　このような難点を克服しレンズＧとレンズＨの間でのビーム径の制約がなく自由に拡大縮小しながら均一ビームを生成できるような光学系を提供することが本発明の第１の目的である。レーザ装置から出てくるビーム実効径ｂとレンズの広がりａとが違っていても同じ非球面レンズを使用できるように汎用性の高い光学系を提供することが本発明の第２の目的である。

【００６１】

【課題を解決するための手段】本発明のビーム整形光学系は、ビーム径制御光学系、強度変換光学部品、位相整合光学部品よりなる。ビームエクスパンダ、ズームエクスパンダ、コリメータなどのビーム径制御光学系によって、目的とするビーム径にする。これはガウス分布を持つレーザ光である。これを強度変換光学部品によって、

ある距離においてビームパワーが空間的に均一になるようにする。パワーは均一になるが、位相は乱れてしまう。そこで次に位相整合光学部品により位相を補正する。つまり本発明の光学系は、ビーム径制御光学系＋強度変換光学系＋位相整合光学系の３つの部品を直列に連結したものである。

【００６２】

【発明の実施の形態】図３に本発明の概略構成図を示す。これらの作用について予め説明する。

［ビーム径制御光学系］レーザ光のサイズ（直径Ｑ）はレーザの幾何学的機構によって決まってしまう。切断、熱処理、溶接などに必要なビームの径（直径Ｒ）は目的物によって決まる。これらは一致しないのが普通である。そこで、ビーム径をＱからＲに変更するための光学系である。これはビームエクスパンダ、ズームエクスパンダ、コリメータなどの光学部品よりなる。既知の光学系によってビーム径を変更する機構を作ることができる。これによって直径がＲの平行ビームを生成する。

【００６３】しかしレーザ光の分布を反映して空間的な強度分布は不均一である。ここではＸＹ面方向にガウシアン分布をしているものとして説明する。またビームは丸くＸ方向、Ｙ方向には異方性がないと仮定する。つまりビーム強度は円筒座標（ｒ、φ）を想定したとき、φの依存性は無いものと仮定する。φ依存性があってもビーム径を変更するには差し支えない。しかし以下の強度変換や位相整合はできない。であるから以下の説明は、ｒ方向にビーム強度がガウシアン分布をしている、という仮定がある。炭酸ガスレーザのように強力なパワーを発生する気体レーザを対象にするからこの仮定は満たされていると考えられる。

【００６４】例えば炭酸ガスレーザの場合、ガウシアンビームを仮定すると、ｒ方向（ＸＹ面に於ける半径）の強度分布は図５のようになる。横軸は半径ｒ（ｃｍ）であり、縦軸は強度である。これはｒ＝０の強度を１に正規化してある。位相は半径方向いずこにおいても同一である。全体において位相の差はない。

「強度変換光学部品］　図４によってこの光学部品の機能を説明する。左がもとのガウシアンビームである。中心付近で高密度パワーをもつ。そこで中心付近のビームは拡大するようにする。つまり中心付近で凹レンズに近いものにする。反対に周辺部ではパワーが低密度であるからビームの広がりを縮めて空間密度を増強する。周辺＊部では凸レンズに近いものにする。

【００６５】例えば図５のガウシアンビームをＲ＝１２．７mmの強度変換レンズによってパワーを均一化したものを図６に示す。ｒ＝１１mmに至るまでの範囲で大体パワーが同一になっている。中央部では１であったものが０．５に低下している。反対に周辺部では、ｒ＝１１mmで０．２４であったものが０．５に増加している。

【００６６】［位相整合光学部品］　光は強度と位相のふたつの成分によって表現することができる。通常のレンズの場合は、球面レンズなので、結像点では位相が揃っている。しかし本発明で採用する強度変換レンズの場合はパワーを均一にするということを目的にするので、位相は犠牲にしてしまう。図７は位相の空間分布を示す。横軸はｒであるが縦軸は位相である。パワーを平準化する為には中央部は凹レンズに周辺部は凸レンズに似たものになると先に述べたが、中央部のレンズが薄いから位相の遅れが小さく、波頭（ウエーブフロント）が中央部で先行するのである。

【００６７】このようなことは球面レンズでは起こらないが、本発明は非球面であるだけでなく、曲率の符号が途中で反転するような複雑な曲面をもつレンズを使うから位相が空間的にばらつくのは当然である。しかも位相がｒとともに単純に減少するのではなく、ｒ＝１ｃｍの辺りで最小になっている。ｒがそれ以上になると位相は進む。これは強度変換のためのレンズが複雑な曲率の変化をしていることを反映している。

【００６８】そこで次に位相を揃えるための光学系を設ける。実際には図１０に示す様に、強度変換用のレンズはビームの入射側が平坦であり、ビームの出射側は回転対称性のある曲面になっている。また位相整合用のレンズはビーム入射側が曲面に出射側が平坦面になっている。そこで曲面側のレンズの厚みをＺ（ｒ）としてレンズの形状を定義できる。つまり両面が曲面であると前面と後面の両方をｒの関数として求めなければならないが、一方が平坦であるということが分かっていれば他方の曲面Ｚ（ｒ）だけを求めれば良いのである。そこで曲率をｃとする球面を第０近似として半径方向変数ｒの偶数次関数として

【００６９】

【数２５】＊

$$Z(r)=\frac{r^2c}{1+(1-(1+K)(rc)^2)^{1/2}}+\sum_{i=1}^{10}A_{2i}r^{2i} \qquad (25)$$

【００７０】によってレンズの曲面を表現する。ここで光軸の方向をＺ軸にしている。ｒが中心からの半径である。Ｋは円錐定数。A_iが非球面係数である。これは二つのレンズについて想定する。二つのレンズについて、ｃもA_iも違う。これは当然である。

【００７１】最適のレンズ曲面を求めるには、光の強度と位相を考慮することが必要である。従来の光線追跡法（幾何光学）では困難である。そこで物理光学による解析を行う必要がある。図８のように面１と面２があるとして、それぞれの振幅の関係を決める式を立てて計算を

する。面1での電界の複素振幅をa_1（x_1，y_1）とする。面2での複素振幅をa_2（x_2，y_2）とする。面1と面2の距離をdとする。a_1（x_1，y_1）の面1での値から、面2での複素振幅に次の式によって求められる。

【0072】

【数26】

$$a_2(x_2,\ y_2)=\frac{1}{jd\lambda}q(r_2,d)\iint a_1(x_1,y_1)q(r,d)\times \exp(-j(k/d)(x_1x_2+y_1y_2)) \qquad (26)$$

【0073】

【数27】

$$q(r_i,\ d)=\exp(j\pi r_i^2/d\lambda) \quad i=1,\ 2 \qquad (27)$$

【0074】

【数28】

$$r_i=(x_i^2+y_i^2)^{1/2} \quad i=1,\ 2 \qquad (28)$$

【0075】（26）をホイヘンス－キルヒホッフの式という。少し違う形態で教科書にも掲載されている式である。つまり簡単にa_2＝（1／jλ）∫∫（a_1／r）exp（jkr）dxdyという表現が多いようである。電界が球面波によって伝搬されるという構造が直観的に分かる。これと（26）は同じものである。ホイヘンスの原理の積分表現であるが厳密に正確な式ではなく近似がある。疑義があってはいけないので、次に（26）を簡単に導く。ホイヘンスの原理は波の伝搬を記述するための有力な原理であり、ある時刻の波の頭の位置がわかると、その波頭から球面波がつくる包絡面の上に次の時刻の波頭ができるというものである。これは球面波exp（jkr－jωt）／rが電界Eを伝搬するというもので、原点にある単位の電界強度が波数kで伝搬すると、その前方距離rの点での素電界dEθは、

【0076】

【数29】

$$dE\theta=\frac{dxdy}{j\lambda}Ei\sin\theta\exp(jkr-\omega t)/r \qquad (29)$$

【0077】によって与えられる。dxdyは積分のための微小体積である。比例定数が1／jλであるということはマックスウエル方程式を解けば分かる。（29）は本質的にホイヘンスの原理を表している。Eθはθ方向の電界である。θは電界Eiとその地点へ引いたベクトルのなす角度である。光線の前方にある点に素電界が作る電界を考える場合は、θが90度であるからsinθは1と置くことができる。また波面が存在するということはその波面にそって電界が連続的に存在するということである。であるから前方rの点での電界は、（29）をxとyについて積分すれば求められるということになる。レンズのように、Z軸に垂直な部材であると、分母のrはレンズ間距離dによって置き換えることができる。変動の激しいexp（）の中のrはdに単純におきかえることができない。面1の点（x_1，y_1）が面2の（x_2，y_2）に形成する電界を考えているから、rは

【0078】

$$r=\{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2+d^2\}^{1/2} \qquad (30)$$

【0079】によって与えられる。このままではexp（jkr）の部分を計算するのが難しいので、近似をする。dがx_1…y_2等よりは大きいので2次以上を省略してrは

【0080】

$$r=d+\{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2\}/2d \qquad (31)$$

【0081】と近似する。exp（jkd）は単に位相を与える定数であるから、普通は省略してしまう。すると変動を与えるのは（31）の2番目の項である。積分はx_2、y_2について行うから、面1の変数と面2の変数に分けて

【0082】

$$r-d=(x_1^2+y_1^2)/2d-(x_1x_2+y_1y_2)/d+(x_2^2+y_2^2)/2d \qquad (32)$$

【0083】の3項に分けることができる。x，yの変数の二乗の和であるから、1項目は$r_1^2/2d$となり、3項目は$r_2^2/2d$となる。exp（jkr）にこれを代入すると、3項目からは

【0084】

$$\exp(jkr_2^2/2d)=\exp(j\pi r_2^2/\lambda d) \qquad (33)$$

【００８５】が出てくる。（２６）式のq（r_2，ｄ）の項に等しい。これは積分の外にかかる項である。（３２）の１項目からは、

【００８６】

$$\exp(jkr_1^2/2d)=\exp(j\pi r_1^2/\lambda d) \quad (34)$$

【００８７】が生ずる。これは（２６）式のq（r_1，ｄ）の項と同じである。これは積分の内部に含まれる変数である。（３２）のクロス項は、そのまま

【００８８】

$$\exp\{(-(jk/d))(x_1x_2+y_1y_2)\} \quad (35)$$

【００８９】の形で（２６）に含まれる。これらの変形によって球面波の包絡面が新たな波面を生成するとするホイヘンスの原理から（２６）式が導かれるということが分かる。ｘ，ｙに対して２次までとる近似をしており、３次以上の高次項は捨てている。

【００９０】（x_1，y_1）の積分の範囲は面１のレンズ面全体である。（２６）のホイヘンス・キルヒホッフ式をx_1、y_1に関し積分することによって面１での電界複素振幅から面２での複素振幅を求めることができるはずである。しかし実際にはコンピュータを使っても２変数の二重積分は容易でない。二重積分であるから時間が掛かりすぎる。またこの場合、初めのビームが分かっており、最後のビームが均一分布であるということであるから、はじめから、面１での複素振幅a_1（x_1，y_1）がきまるというわけでない。これをある関数として仮定しても、計算時間は膨大である。ｅｘｐ（）の部分がフーリエ級数になっているから高速フーリエＦＦＴを使って高速計算できる。しかし、これはある範囲で積分を打ち切るから精度が悪いという難点がある。実際にはＦＦＴでは有用な結果が得られない。

【００９１】レンズが二次元的な広がりをもつのでx_1，y_1の２変数の２重積分になるのは当然のことである。やむを得ないことと思えるが、しかしそのまま（２６）式では時間が掛かってなお実用的ではない。波動光学の教科書にも（２６）の式より単純化された式は掲載されていない。様々の波動光学の論文も本発明者は渉猟した。しかしこれよりも単純化された式は提案されていない。キルヒホッフの式あるいは（２６）式そのままではある定まったひとつのa_1（x_1，y_1）について計算時間が数日かかる。数多くの試験関数｛a_1（x_1，y_1）｝について計算し比較しなければなならないのでやはり実用化はできない。

【００９２】式（２６）について本発明者は計算時間を短縮できる可能性に付いて考えた。レンズが円筒対称（回転対称）であるからa_1（x_1，y_1）も回転対称であると考えられる。レーザビームも円筒対称であることが多いのでこれは悪い仮定ではない。またレーザビームを円筒対称のガウシアンとすれば、a_1（x_1，y_1）は回転対称であるはずである。するとｘ，ｙ座標を円筒座標に変えて（ｒ，θ）を変数とすることができる。a_1はθ依存性がないからｒだけの依存性をもつ。するとθに関する項はふたつのベクトルの内積からでてくるが、

【００９３】

$$x_1x_2+y_1y_2=r_1r_2\cos\theta \quad (36)$$

【００９４】となる。但し座標系はx_2，y_2の方向を動径の基線とした座標である。θはであるからベクトル（x_1，y_1）と（x_2，y_2）のなす角度である。θによる積分は、$q=r_1r_2k/d$として、

【００９５】

$$\int\exp(-jq\cos\theta)\,d\theta \quad (37)$$

【００９６】となる。θの積分の範囲は１周期である。他にθを含まないから１周期の積分であると、ｃｏｓをｓｉｎで置換してもよい。つまり

【００９７】

$$\int\exp(-jq\sin\theta)\,d\theta \quad (38)$$

【００９８】として１周期の積分を行っても良い。ベッセル関数Ｊｎ（ｑ）の母関数展開は次のように与えられる。

【００９９】

【数３９】

$$\exp\left\{\frac{q}{2}\left(t-\frac{1}{t}\right)\right\}=\Sigma\, t^n J_n(q) \quad (39)$$

【０１００】となる。Σのｎの値はマイナス無限大からプラス無限大の整数値である。そこで$t=\exp(-j\theta)$とおくと、（３９）は、

【０１０１】

$$\exp(-jq\sin\theta)=\Sigma\exp(-jn\theta)J_n(q) \quad (40)$$

【０１０２】となる。両辺をθによって１周期分積分すると、右辺でｎが０以外の項は全て０になるので落ちる。０次ベッセルだけが残る。（３８）は

【０１０３】

$$\int\exp(-jq\sin\theta)\,d\theta=2\pi J_0(q) \quad (41)$$

【０１０４】という簡単な式になる。θの積分ができてしまい、r_1だけの一重積分に還元される。これによって大幅に単純化される。a_1（x_1，y_1）はr_1だけの関数a_1（r_1）と書けるし、a_2（x_2，y_2）もr_2だけの関数a_2（r_2）になる。これも単純化に寄与するところが大きい。２変数のa_2（x_2，y_2）が

rだけの関数に単純化されるので計算すべきものの数自体が減少するのである。θの依存性がないという妥当な仮定によって、計算自体を単純化し計算の対象数も減少させるのである。２重に単純化され計算が格段に楽になる。

【０１０５】

【数４２】

$$a_2(r_2) = \left(\frac{-jk}{d}\right) q(r_2, d) \times \int a_1(r_1) q(r_1, d) J_0(k r_1 r_2 / d) r_1 dr_1 \quad (42)$$

【０１０６】これは面１と面２の電界の振幅の間の関係をあたえるものである。平行ビームがある密度の偏り$h(r)$を持って平坦側から入射したときにレンズの作用によってどのような電界分布を発生するのか？ということが分からなくてはいけない。これは次の式によって与える。$a_1(x_1, y_1)$はすでにr_1だけの関数としているから、$a_1(r_1)$となっているのであるが、ここではr_1だけが変数であるから、r_1の１を省略して表記すると、

【０１０７】

$$a_1(r) = I_1(r)^{1/2} \exp(jkr^2/2R) \times \exp(jkh_1(r)(n-1)) \quad (43)$$

【０１０８】が、強度変換レンズ厚み$h_1(r)$、レーザ強度$I_1(r)$とレンズ通過後の電界振幅a_1の関係を与える。レーザ強度は電界の２乗であるから、平方根がレーザによる電界を与える。レーザビーム強度I_1はこれまではガウシアンとして説明しているが、任意のr分布をしていても差し支えない。別段ガウシアンでなくてもこの式によってa_1を計算することができる。積因子の２項目のRは入射レーザビームの波面の曲率半径である。波頭が球面をなす場合は中心で波頭が先行し、周辺で遅れる。Rとrを２辺とする直角三角形の斜辺とRの差が、周辺部での波頭の遅れになる。これは近似の範囲で$r^2/2R$である。これが積係数の２項目に現れる。平行ビームの場合は平面波であるからRは無限大となりこの項は１になる。球面波であってもa_1を計算することは容易である。積因子の第３項は屈折率nのレンズが厚みhをもつために空気の場合に比べて$(n-1)h$だけ光学距離が増えることに起因する項である。レンズの効果はすべてこの項に含められる。

【０１０９】これによってレーザビームの強度の空間分布$I_1(r_1)$と強度変換後の電界強度分布$a_1(r_1)$を結び付けることができる。a_1とa_2を結び付けるのは先述の式である。

【０１１０】位相整合レンズの作用は、レンズの厚み$h_2(r_2)$によって電界a_2をどのように変化させて出射ビーム$I_2(r_2)$とするか？ということであるが、これ先述の（１６）と同じ式になる。これは光学系の相反性から当然のことである。

【０１１１】

$$a_2(r) = I_2(r)^{1/2} \exp(jkr^2/2R) \times \exp(jkh_2(r)(n-1)) \quad (44)$$

【０１１２】となるのである。Rは出射後の変換ビームの球面波としての半径である。平行ビームとして取り出す場合はRが無限大でこの項は１になる。このようにして、入射レーザビームの強度分布$I_1(r_1)$から、強度変換部品通過後の電界振幅$a_1(r_1)$を求め、これから空間伝搬後の電界振幅$a_2(r_2)$を知り、さらに位相整合後のビーム分布$I_2(r_2)$を求めることができる。

【０１１３】計算の順序はこうなのであるが、実際に分かっているのは、所望の範囲で平坦分布を与えるべき$I_2(r_2)$と、はじめのレーザ強度分布$I_1(r_1)$である。強度変換レンズによってパワー密度をある範囲で均一にすると言っても、$a_1(r_1)$自体が均一の振幅になるのではない。最適のものを設計するとすれば、最終的に直径Dのパワー均一（ｔｏｐ　ｈａｔ）のビームを得たいとすると、

【０１１４】

$$I_2(r_2) = C \quad r \leqq D/2 \quad (45)$$

$$0 \quad r > D/2 \quad (46)$$

【０１１５】というような課題を与える。初めのレーザビームの強度分布が分かったとして本発明の計算を開始できる。回転対称性のある任意のビームを扱えるが、ここでは、標準偏差をσとするガウシアンだとすると、r_1を単にrと書いて、

【０１１６】

$$I_1(r) = A \exp(-r^2/2\sigma^2) \quad (47)$$

【０１１７】のように書ける。強度変換レンズの分布$h_1(r_1)$は分からない、a_1からa_2へ変換されたときa_2は位相分の変動は存在するが、絶対値はもうその段階で一定値Cになっている必要がある。この条件からレンズ３（強度変換レンズ）の厚み分布$h_1(r_1)$が決まる。一度の計算では求められないが、何度も試行関

数に基づいて何度も計算することによって最適のh_1（r_1）を求めることができる。これがわかるとa_2の位相分布も決まるから、レンズ４（位相整合）の厚み分布をも決めることができる。

【０１１８】

【実施例】本発明のレーザビーム整形光学系は、ガウシアン分布強度をもつレーザビームを適当な直径のほぼ平行なビームに変換するビーム径制御系（ビームエクスパンダーなど）と、そのビーム径の平行レーザ光を、均一パワー分布に変換する強度変換光学系と、位相を揃える位相整合光学系とからなる。強度変換光学系は例えば一枚のレンズによって実現する事ができる。位相整合光学系も一枚のレンズによって構成できる。

［ビーム径制御径］　ビーム系制御系というのは、ガウシアン分布のビームを適当な直径の平行ビームに修正するものである。これは球面レンズの組み合わせによって作ることができる。レーザビームが平行であって、ガウスビームであるとすれば、これを拡大或いは縮小するのは通常の幾何光学によって論ずることができる。拡大する場合は、凹レンズ凸レンズの組み合わせによってなされる。拡大率は凸レンズの焦点距離を凹レンズの焦点距離で割った値になる。

【０１１９】図１６はビームエクスパンダの光学系を示す。入射レーザ光は平行ビームである。発散レンズは凹面と平面を持つ凹レンズである。これによってビームは広がる。これをコリメータレンズによって平行光に戻す。ビームの直径は増大している。ビームエクスパンダは公知である。反対に縮小する場合は凸レンズ凹レンズの組み合わせによってできる。この場合も縮小率は凹レンズ焦点距離を凸レンズ焦点距離で割った値になる。もちろん二つの凸レンズの組み合わせによってもこれは可能である。

【０１２０】炭酸ガスレーザのビームを対象にする場合はほぼ平行ビームであるから、二つのレンズの組み合わせによって拡大縮小するこごとができる。炭酸ガスレーザの光の場合はＺｎＳｅなどの赤外光を通すレンズを使う。これらはレンズを用いる透過光学系である。しかし透明な材料の無い波長の場合は、ミラーを用いることになる。その場合でも球面に近似した二次関数の曲面をもつミラーをふたつ使ってビームを拡大縮小できる。この実施例の場合は、図１３に示すような口径の２枚のレンズ１、レンズ２を用いている。光源は炭酸ガスレーザ、レンズはＺｎＳｅである。発散用第１レンズは直径３８．１φ、コリメートレンズ２は５０．８φのレンズであり、ビームエクスパンダーの長さは２５０ｍｍである。

【０１２１】［強度変換光学部品］　ビーム径の拡大縮小などは収差がなければ在来の球面レンズによって構築する事ができる。強度変換のレンズ、位相整合のためのレンズは、ビーム径と分布に併せて作られる。ガウシア

ンビームであってそのパラメータσが一定である場合にレンズ３の曲面が決まる。曲面は先ほど説明した式によって計算することができる。レンズ径は５０ｍｍと大きいが、均一化するビームの直径は２０ｍｍである。ビームを突効的に縮小している。ために変曲点が２つ存在するような曲面になる。

【０１２２】図１０に本発明の思想に従って試作したレンズを示す。レンズ３は強度変換レンズである。光が入射する方の面は、平坦であり出射面の曲面ｚ（ｒ）を与える。これは表１の左欄に示したパラメータを持っている。レンズ３の平坦面側の外周部に半径０．５ｍｍ、幅１ｍｍ、深さ０．５ｍｍの切り欠きをリング状に付けている。これはマウントとの接触部において発生する応力を切り欠きによって解放し、歪みがレンズ中央にまで伝搬しないようにするためである。さらに曲面側では周辺部に段差を付けてマウント接触部からの応力を解放している。このようにレンズの変形が少しでも起こると均一分布にならないから、変形が起こり難いような工夫をしている。これは本発明のレンズが特に熱線にさらされて膨張収縮しやすく，応力が発生し易いことから特別の工夫をしたものである。図２１は従来の可視光などでよく使われるレンズの固定方式を示す（厚み変化は示さない）。レンズの端は平坦であってそのままＯリングを挟み、螺で止める。可視光でパワーが弱い場合はこのような支持でよい。本発明は強力な赤外光を通すからレンズが加熱され熱歪みを起こす。図２１のように平坦なレンズの場合に実際にビームを通した時のレンズ面の歪む有様を測定した。その結果を図２０に示す。周辺が拘束されているため膨張すると中央部が高く隆起する。中央部では０．８μｍ程度も盛り上がっている。これでは困る。

【０１２３】そこで図２３に示すようにレンズの周辺に段差を付ける。さらに反対側の周辺部には切込を設けている。これらの段差や切込が熱応力を緩和しレンズの変形を防ぐことができる。図２２に実際にビームを通した時のレンズ面の高さ変化の測定結果を示す。高さの差はせいぜい０．０５μｍの程度である。中央部が低く周辺部が高くなるような変形をしている。段差や切込のないレンズの場合に比較して熱歪みが格段に小さい。段差切込によって熱応力の発生を有効に阻止している。　しかし段差や切込を設けるのは簡単ではない。ありふれたガラスと違いここで用いるレンズはＺｅＳｅである。堅くて脆いので加工が難しい。超精密旋盤（Ｓｉｎｇｌｅ Ｐｏｉｎｔ Ｄｉａｍｏｎｄ）によってより精密に、例えば刃先送りを１μｍにするように微細な加工をすることによって段差や切込をレンズの周辺に付けることが出来る。このような工夫は強度変換レンズにも位相整合レンズにも適用する。

【０１２４】またビームエクスパンダの部分では図１３に示すようにレンズの間隔を調整（矢印方向）できるよ

うにしている。間隔調整によって製作誤差や厚み誤差の影響を除くことができる。さらにふたつのレンズ３、４の間隔は１７０mmとするがこれも微調整が可能である。間隔の調整にはヘリコイドネジを手動回転する、或いはヘリコイドネジをモータで回転するなどの手段を用いる。図１９にレンズ３，４を支持する光学系部分を示す。レンズは強熱されるから冷却水を通して冷却する。＊レンズマウントは、着脱が容易なように、ボルトを使用せず、セットピンと固定ネジを用いたワンタッチ式にした。さらに操作性を向上させるために４つのレンズの固定は２重マウント式にすると良い。

【０１２５】

【表１】

強度変換光学部品（レンズ３）のパラメータ表

	レンズ１のパラメータの値
直径	５０．８mm
CA	４４　mm
CT	６　mm
C	０　mm
K	－１　mm
A_2	8.737863400×10^{-4} mm^{-2}
A_4	$-3.064721130\times10^{-6}$ mm^{-4}
A_6	$-4.237546130\times10^{-8}$ mm^{-6}
A_8	$7.956022830\times10^{-10}$ mm^{-8}
A_{10}	$-7.327862700\times10^{-12}$ mm^{-10}
A_{12}	$3.960417550\times10^{-14}$ mm^{-12}
A_{14}	$-1.276025030\times10^{-16}$ mm^{-14}
A_{16}	$2.407942750\times10^{-19}$ mm^{-16}
A_{18}	$-2.454606390\times10^{-22}$ mm^{-18}
A_{20}	$1.043152440\times10^{-25}$ mm^{-20}
ET'	６．０７１２０４２６８　mm
ET	５．０８　mm

【０１２６】直径が５０．８mm、曲面部分の直径CAが４４mm、中心部でのレンズの厚みCTが６mmである。さらにr^{2i}の係数を与えるA_{2i}の値も表１の左欄に表している。ｃ＝０としている。これは平面を０次近似としているということである。すると曲面は全て非球面係数A_{2i}によって決まることになる。$Z(r)=\Sigma A_{2i} r^{2i}$である。強度変換レンズの実際の形状は図１４に示す。これはｒの関数Ｚを示すから、実際のレンズはＺ軸を軸として対称に折り返して得られる曲面になる。ｒ＝０で厚みが最小であり、ｒとともに厚みは増えるがｒ＝１１mmで極大になる。ここまで凹レンズに近い作用をし、中央を通るビームを発散させる機能を担う。ｒ＝１１mmの近くでは凸レンズに近くなりビームを反対に集中させる作用を持つ。

【０１２７】図６に示すように半径ｒ＝１１mmの範囲でビームエネルギーを均一にするのが目的であるから、ｒ＝１１mmの近くで凸レンズに近似するのは合理的なことである。ｒが１１を越えると厚みが減少し始める。ｒ＝１９mmで極小になる。この部分では凹レンズのような作用をする。これによって図６のように$r\leqq 11$mmの円形領域でほぼ平坦な分布になっている。

【０１２８】［位相制御用光学部品］　位相制御用のレンズ４は光の入射する方向の面が曲面になっており、出射面は平坦面である。そこで入射面の曲面ｚ（ｒ）を決めることによってレンズを定義することができる。中央部は凸レンズに近似した形状になる。図５のように、中央部で光の位相が進むからこれを補償するように中央部で分厚いレンズが採用される。強度変換レンズと反対の厚み分布を持つ。ｚ（ｒ）は入射側の曲面のビーム進行方向に向けた値を表現する。だから、中央の厚みCTから、ｚ（ｒ）を差し引いたCT－ｚ（ｒ）が半径ｒでの厚みを表す。

【０１２９】表２に位相制御用レンズのパラメータを示す。強度変換のレンズ３と低次項A_2、A_4が同じ傾向にあるように見えるが実はそうでない。パラメータＡの符号の定義はレンズ３の場合とレンズ４の場合で正反対

であると言って良い。レンズ３の場合はA_2が正であるから、凹曲面を持つ。レンズ４もA_2は正であるが定義が反対であるからレンズ４は本質的に凸レンズの一種である。レンズ４においてもマウントの応力を吸収するため＊めに段差、切り欠きを設ける。

【０１３０】

【表２】

＊

位相整合光学部品（レンズ４）のパラメータ表

	レンズ４のパラメータの値
直径	５０．８mm
ＣＡ	４４　mm
ＣＴ	６　mm
Ｃ	０　mm
Ｋ	－１　mm
A_2	6.639488029×10^{-4} mm^{-2}
A_4	$-4.522692694\times10^{-6}$ mm^{-4}
A_6	8.338960594×10^{-8} mm^{-6}
A_8	$-8.147973318\times10^{-10}$ mm^{-8}
A_{10}	$1.846210617\times10^{-13}$ mm^{-10}
A_{12}	$1.385616237\times10^{-14}$ mm^{-12}
A_{14}	$-9.988595086\times10^{-17}$ mm^{-14}
A_{16}	$2.653432821\times10^{-19}$ mm^{-16}
A_{18}	$-3.317122704\times10^{-22}$ mm^{-18}
A_{20}	$1.627068113\times10^{-25}$ mm^{-20}
ＥＴ'	５．９６０００８４８４　mm
ＥＴ	５．０８　mm

【０１３１】図１５に厚みｚ（ｒ）の実際の形状を示す。ｒ＝１３ｍｍまでほぼ平坦である。ｒ＝１５ｍｍ程度から立ち上がる。立ち上がるというのは薄くなるということである。２０ｍｍで急激に薄くなる。中央部でどうして平坦であって良いのかというと直観的には次のような訳である。強度変換レンズ３において中央部は凹面である。位相整合レンズ４はこれを補う形状でなければならない。レンズ３はビームを発散させるからレンズ３の凹面が、その倍率だけ半径方向に広がる。拡大率だけレンズ３の凹面を面方向に広げるからレンズ４はほぼ平坦になるのである。

【０１３２】直観的な理由はそのようなものである。レンズ３より、レンズ４が平坦に近いということは、A_2の値が（$6\times10^{-4}mm^{-2}$）小さく、A_4の値が大きい（$-4\times10^{-6}mm^{-4}$）ことによる。強度変換レンズ３、位相整合レンズ４は、いずれも入射してくる平行ビームの大きさがある定まった値である時のみ、均一出力を生ずる。入射するガウシアンビームの大きさが少しでも所定の値から外れると、均一パワーを得ることができない。であるからビーム径制御光学系（レンズ１とレンズ２）によって、厳密に所定直径のビームに変化する必要がある。

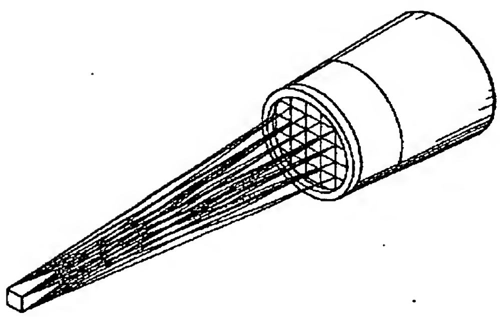
【０１３３】図９は入射ビーム径を少し変えた時の位相整合レンズを通過したビームの空間分布を示す図である。レンズ３とレンズ４の間隔はｄ＝１７０ｍｍである。入射平行ビーム径が２０ｍｍ（半径１０ｍｍ）の時に最適均一分布になるように、レンズ３、４が設計されている。実線は入射ビーム半径がｗ＝１０ｍｍの場合のパワーの半径方向分布を示す。１０ｍｍまでパワーは同一で０．５（相対値）になっている。

【０１３４】ところが入射ビーム半径がｗ＝９ｍｍの場合（破線で示す）ｒ＝６ｍｍから出力が低下し始める。ｒ＝１０ｍｍで０まで低下する。つまり凸字型の分布を示す。これはビームが細すぎて周辺部に配分されるパワーが不足するからである。反対に入射ビーム半径がｗ＝１１ｍｍの場合（粗い破線で示す）ｒ＝６ｍｍぐらいから増え始める。ｒ＝９ｍｍで急増しｒ＝１０ｍｍで１．０５にも達する。凹字型の分布を示す。これはビームが太すぎて周辺部に配分されるパワーが増えすぎるためのである。

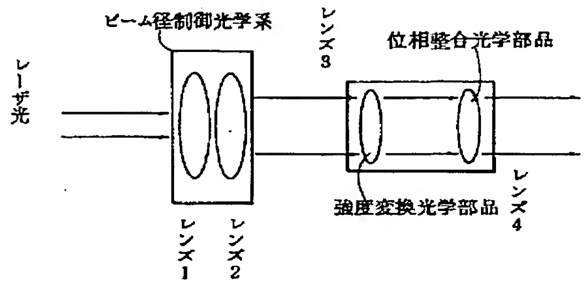
【０１３５】このようにビーム径が異なると周辺部に配分されるエネルギーが著しく変動するから、最適径が厳密に決まっているレンズ３による強度変換、レンズ４による位相整合を行うと、周辺部でのパワーが所定の値か

ら著しくずれてしまう。これは前段のビーム径制御光学系の役割が重要だということを意味している。
【０１３６】この例では、レンズの半径が２５．４ｍｍであって、所望の均一分布ビームの半径が１０ｍｍである。レンズ３とレンズ４の間でビームの縮小が行われているのである。これは先述の②ＵＳＰ３，４７６，４６３ではできないことである。またレーザ光源からのビームの径を修正するということも前記の②ではなされていない。本発明は波動光学の式を用いてレンズの厚み分布を仮定し電界の伝達の式によってa_1（x_1，y_1）とa_2（x_2，y_2）の関係を求め、所与の光量分布を与えるレンズ分布を求めるものである。波動光学式は簡単には積分ができず発散しがちであるが、本発明者の独自の工夫によって波動光学の式を積分できるようになっている。ひとつのレンズ厚みの仮定に基づいて１回の計算をするのに数時間程度で済む。これによってレンズの設計が可能になっている。レーザ光源のビーム大きさの制約のない優れた均一パワービーム整形装置を与えることができる。
【０１３７】
【発明の効果】炭酸ガスレーザやＹＡＧレーザのように高出力のレーザにおいて、金属の表面焼き入れや、セラミック、樹脂の孔開けなどに使用するばあいビーム強度分布が一様であることが要求されることがある。レーザビームは一般にガウシアンであって、不均一であるが、本発明によればある半径内においてパワーを均一に位相を同一になるように整形することができる。
【０１３８】本発明の装置はビーム径制御光学系によってレーザビームの径を広げあるいは縮めて所定の半径の平行ビームにするから、所定の曲面の強度変換レンズと位相整合レンズを用いることができる。均一パワーのレーザビームを必要とする多くの用途に適用する事ができる。
【図面の簡単な説明】
【図１】広い面積のビームを縦横に分割し分割面からの部分光を重ねて均一分布の光に変えるカライドスコープの原理を示す斜視図。
【図２】カライドスコープによるパワーの均一化は細かいパワー揺らぎを伴うものであることを説明するパワー分布図。
【図３】ビーム径制御光学系、強度変換光学系、位相整合光学系よりなる本発明の装置の概略を示す構成図。
【図４】強度変換レンズによってガウシアン分布ビームを平坦分布のビームに変換する場合のレンズの作用を直観的に説明する図。
【図５】ガウシアン分布をもつレーザビームの半径方向の強度分布図。横軸は中心からの半径方向距離（ｃｍ）、縦軸は相対強度。
【図６】ガウシアンビームを強度変換レンズによって平坦な強度分布に変換した後のパワー空間分布図。横軸は中心からの半径（ｃｍ）、縦軸は相対強度。
【図７】強度変換レンズによって、平坦な強度分布にしたときにおける位相の空間分布図。
【図８】本発明の強度変換と位相整合のレンズ間で、強度変換後の複素振幅a_1（x_1，y_1）が空間によって、位相整合レンズ面でどのような複素振幅a_2（x_2，y_2）になるかを説明するための概略図。
【図９】入射ビーム径による強度分布の変化を示す図。実線はビーム径が１０ｍｍで最適のビームの場合を表す。この場合平坦なパワー分布に矯正できる。細かい破線はビーム径が９ｍｍの場合を示す。周辺部（ｒ＝１０ｍｍ）でパワーが減退する。粗い破線はビーム径が１１ｍｍの場合を示す。周辺部で逆にパワーが過大になる。
【図１０】本発明で用いる強度変換レンズ３と位相制御レンズ４の寸法パラメータを定義するための図。
【図１１】整形前のビームの二次元パワー分布図。中央部にエネルギーが局在するガウシアン分布をするビームを示す。
【図１２】整形後のビームの二次元パワー分布図。局在が解けて一定半径の円形領域におけるパワーが均一（トップハット型分布ともいう）になっている。
【図１３】実施例に於けるビームエクスパンダーの配置と寸法を示す図。
【図１４】強度変換レンズの厚みの半径方向の変化ｚ（ｒ）を表すグラフ。
【図１５】位相制御レンズの中央厚みＣＴからの減少量ｚ（ｒ）を半径距離ｒの関数として示すグラフ。
【図１６】ビームエクスパンダの光学系図。
【図１７】米国特許ＵＳＰ３，４７６，４６３に掲載されている均一分布レンズ系の光線追跡図。
【図１８】同じ明細書の対向レンズ間の光線と寸法角度の定義を示す説明図。
【図１９】強度変換レンズと位相整合レンズを支持する光学系の例を示す断面図。
【図２０】段差や切込のないレンズを光学系に固定しビームを通して加熱したときのレンズの変形を実測したときの表面の高さ分布図。
【図２１】段差や切込のレンズを固定する従来例のレンズ固定機構を示す断面図。
【図２２】段差と切込を周辺部に切り欠いて応力を開放するようにしたレンズ固定機構において実際にビームを当てて熱変形を起こさせた時の表面高さの分布図。
【図２３】段差と切込を周辺部に切欠いたレンズの固定構造を示す断面図。

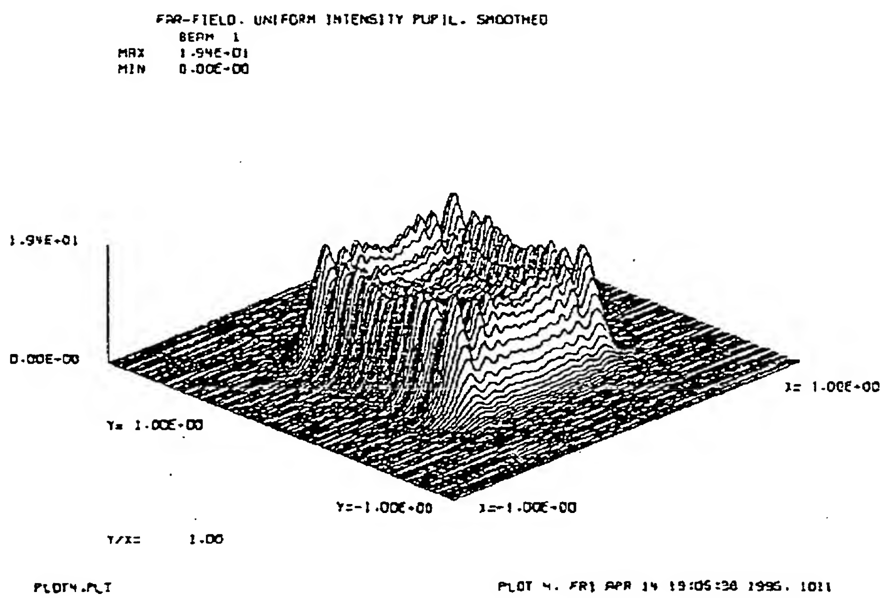
【図1】



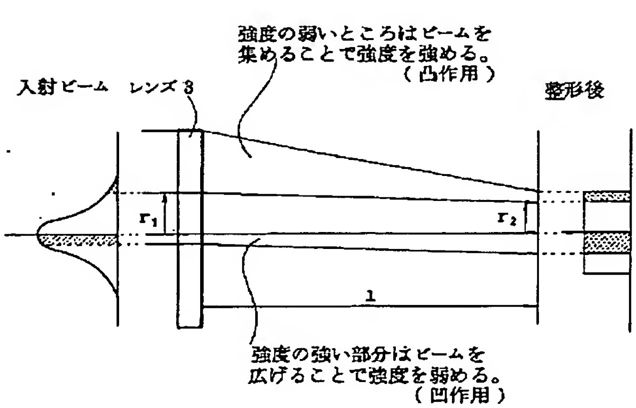
【図3】


ビーム径制御光学系
レンズ3
位相整合光学部品
レーザ光
強度変換光学部品
レンズ4
レンズ1
レンズ2

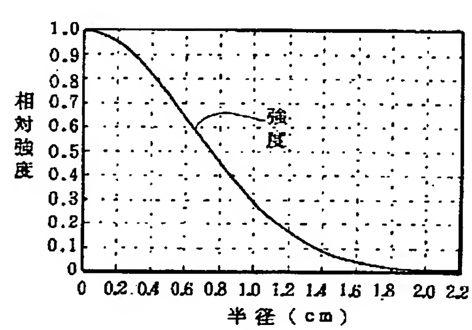
【図2】


FAR-FIELD. UNIFORM INTENSITY PUPIL. SMOOTHED
BEAM 1
MAX 1.94E-01
MIN 0.00E-00
1.94E-01
0.00E-00
X= 1.00E+00
Y= 1.00E+00
Y=-1.00E+00
X=-1.00E+00
Y/X= 1.00
PLOT4.PLT
PLOT 4. FRI APR 14 19:05:38 1995. 1011

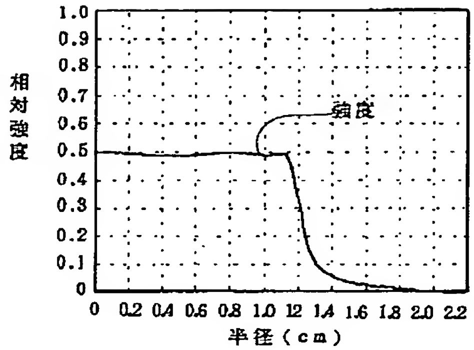
【図4】


強度の弱いところはビームを
集めることで強度を強める。
（凸作用）
入射ビーム
レンズ3
整形後
r1
r2
1
強度の強い部分はビームを
広げることで強度を弱める。
（凹作用）

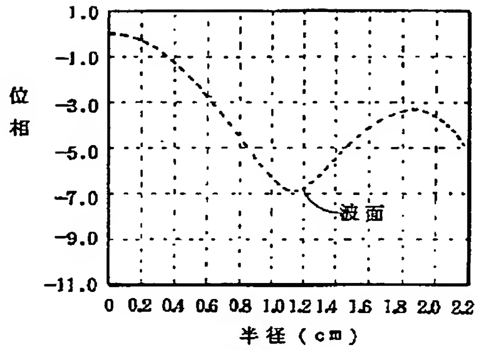
【図5】


1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
相対強度
強度
0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2
半径（cm）

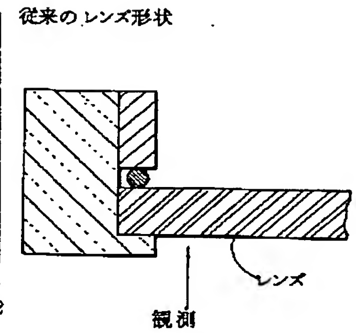
【図6】



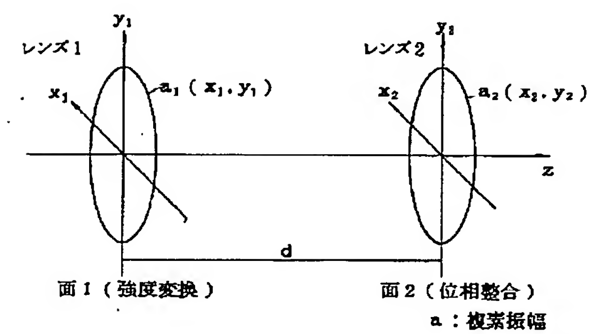
【図7】



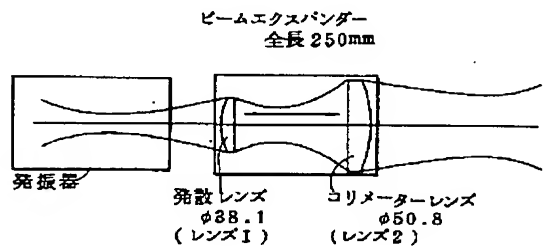
【図21】



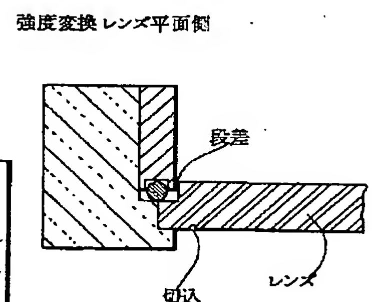
【図8】



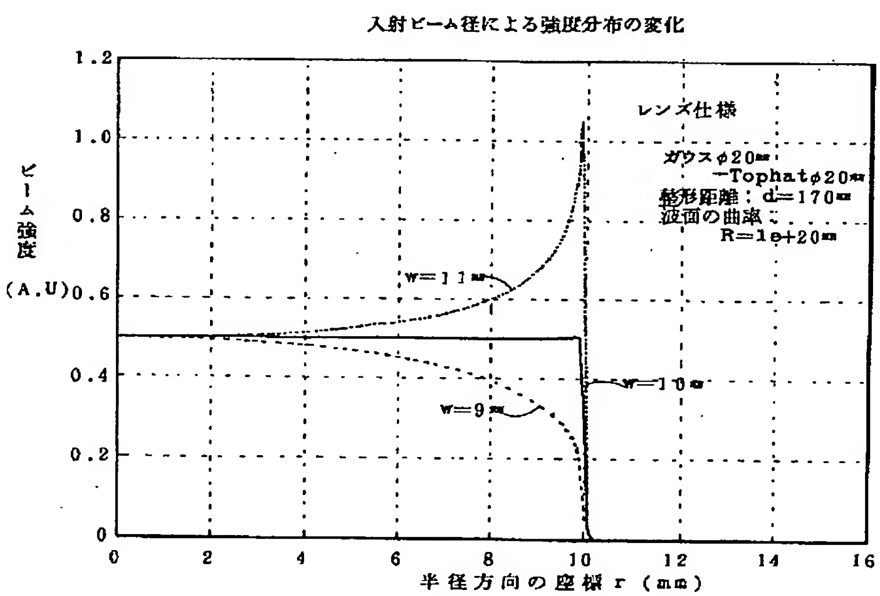
【図13】



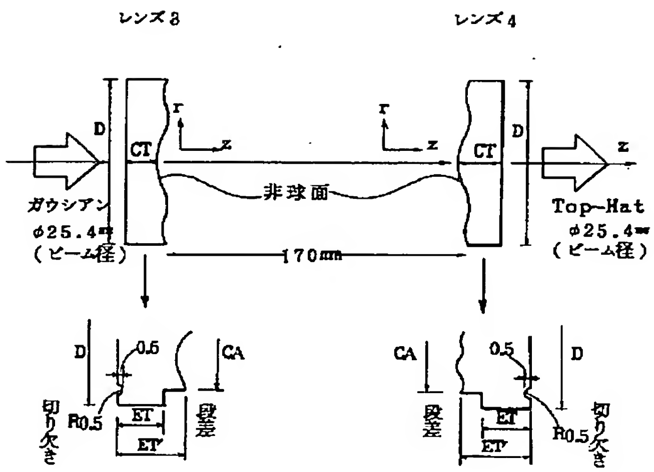
【図23】



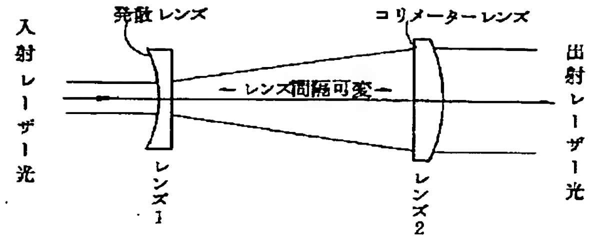
【図9】



【図10】

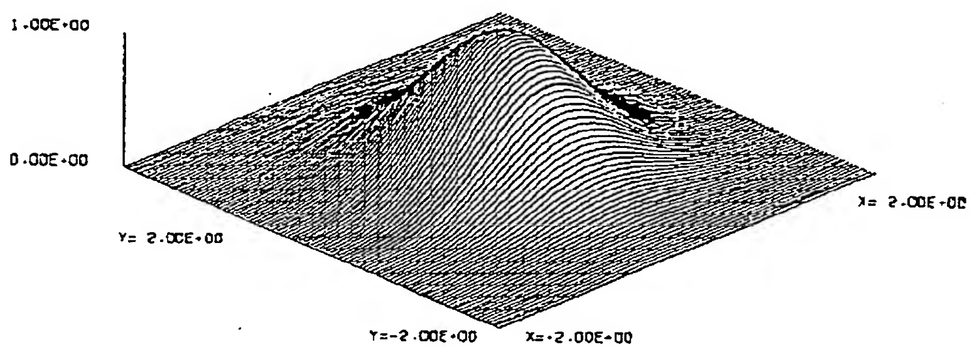


【図16】

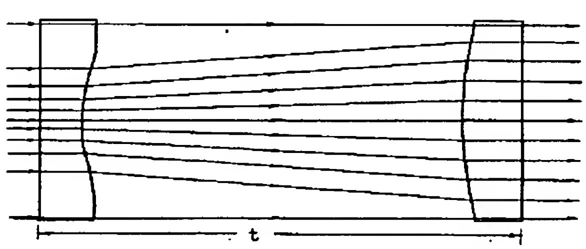


【図11】

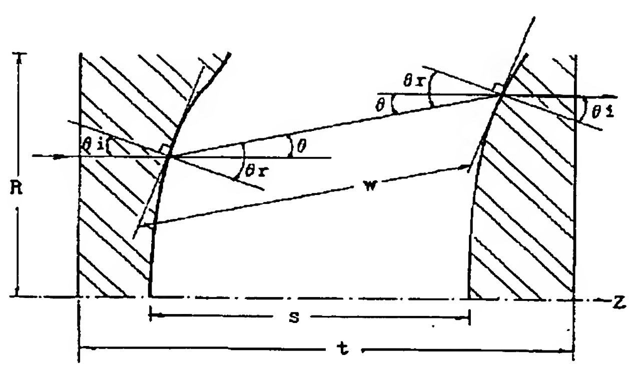
整形前のビーム



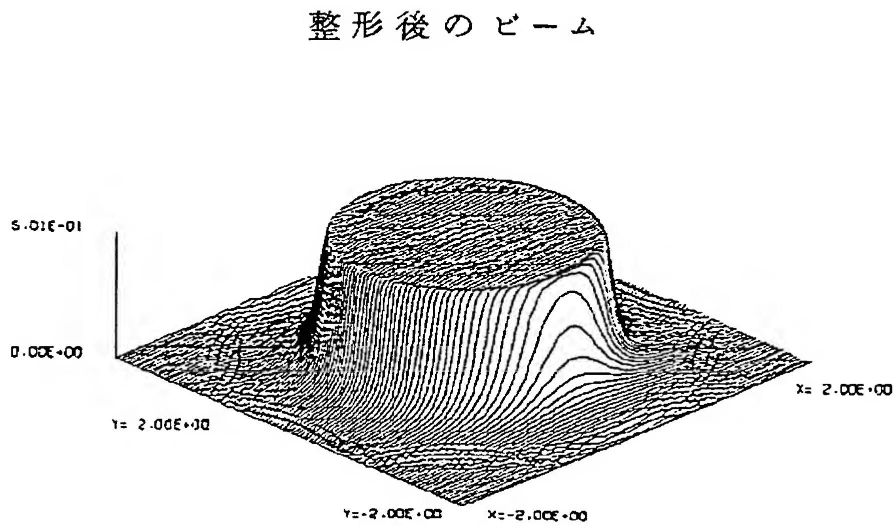
【図17】



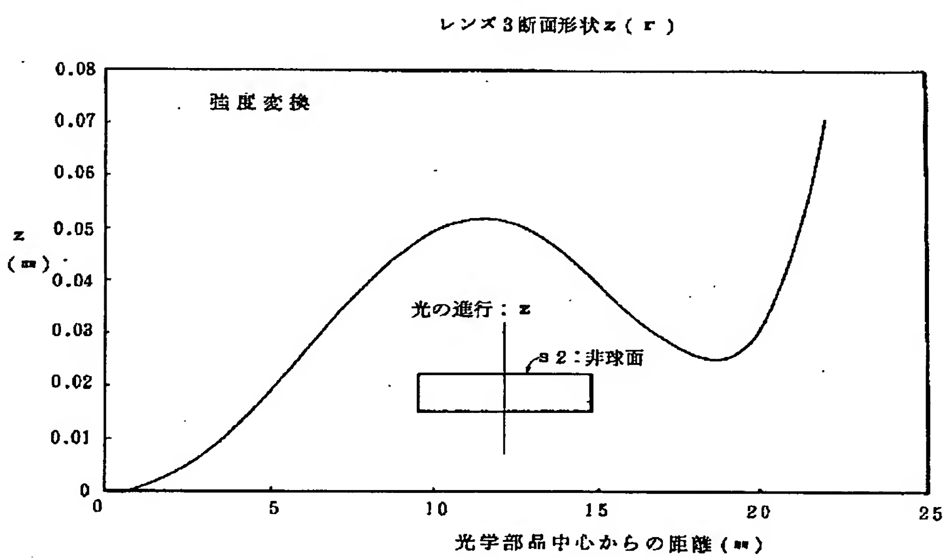
【図18】



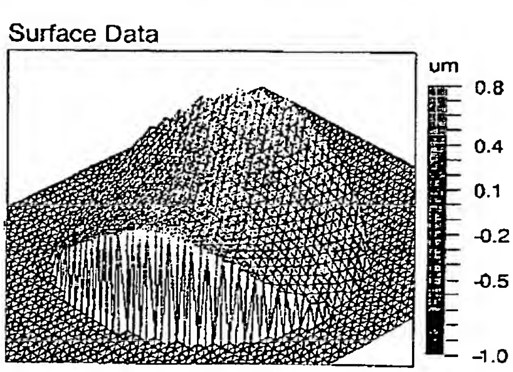
【図12】



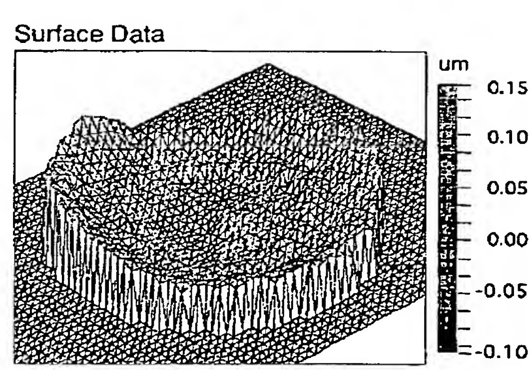
【図14】



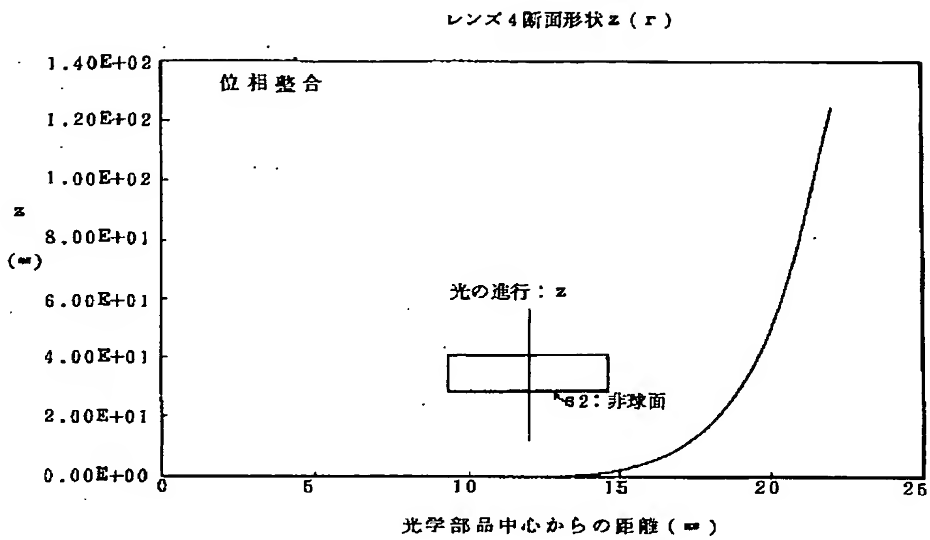
【図20】



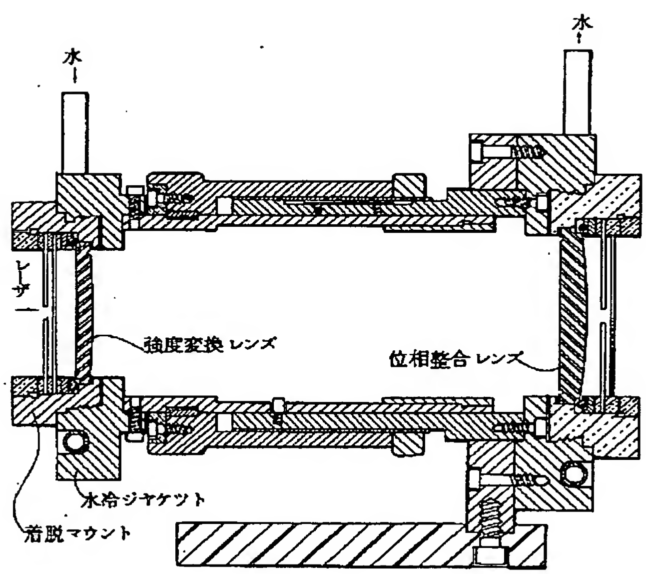
【図22】



【図１５】



【図１９】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.⁶	識別記号	ＦＩ	
Ｇ０２Ｂ　7/02		Ｇ０２Ｂ　7/02	Ｆ